

УДК 681.2.08: 531.716

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНЫХ МЕТОК

А.Е. Гольдштейн, Е.И. Уразбеков\*

Томский политехнический университет

E-mail: algol@ephd.tpu.ru

\*ООО «НИИ ЭРМИС», г. Томск

E-mail: ermis@mail.tomsknet.ru

*Исследованы причины и характер влияния на результат измерения длины ферромагнитных изделий методом магнитных меток скорости движения изделия. Предложен способ уменьшения этой зависимости, основанный на коррекции длины мерной базы в зависимости от скорости движения изделия и позволяющий обеспечить высокую точность измерения при малой длине мерной базы и большом диапазоне изменений скорости движения.*

Сущность метода измерения длины протяженных ферромагнитных изделий с использованием магнитных меток (метода магнитных меток) заключается в нанесении на движущееся изделие импульсным электромагнитом магнитных меток, считывании этих меток расположенным на фиксированном расстоянии от электромагнита магнитным преобразователем, нанесении каждой последующей метки в момент считывания предыдущей, подсчете числа считанных магнитным преобразователем магнитных меток и определении длины изделия путем умножения числа посчитанных магнитных меток на базовое расстояние [1].

Наибольшее применение метод магнитных меток нашел при производстве геофизических исследований скважин для измерения длины спущенного в исследуемую скважину каротажного кабеля [2, 3]. Основным фактором, влияющим на точность измерений длины в этом случае является удлинение кабеля под действием механических нагрузок и температуры. Изменение скорости движения объекта измерения существенного влияния на точность измерений не оказывает, поскольку разметка кабеля магнитными метками как правило производится заранее, на стационарных либо переносных разметочных установках. При этом обеспечивается постоянная и относительно небольшая скорость разметки (порядка 0,5...1,5 м/с). Кроме того, в конструкции разметочных установок используется мерная база достаточно большой длины (от 1 до 20 м).

В случае использования метода магнитных меток для измерения длины изделий при непостоянных и достаточно больших скоростях движения (до 10 м/с), а также относительно малой длине мерной базы (менее 1 м) влияние скорости на точность измерений длины становится весьма существенным и может привести без учета этого влияния к погрешности измерений порядка единиц – десятков %. В частности, такая проблема возникает при решении задачи измерения длины стальных канатов непосредственно в технологической линии их производства, когда скорость движения определяется техническими характеристиками крутильной машины и параметрами каната, а длина мерной базы ограничена относительно малым по размеру в

продольном направлении местом, отводимым для установки измерителя.

Главными факторами, обуславливающими влияние скорости движения изделия на результат измерения его длины методом магнитных меток, являются деформация магнитной метки и ее смещение в продольном направлении при изменении скорости движения. Физически это объясняется следующим. В известных устройствах, реализующих метод магнитных меток, для считывания магнитных меток используется магнитомодуляционный измерительный преобразователь, а на изделие наносят магнитные метки вида (полярности)  $SNNS$  либо  $NSSN$ . В частности, для разметки каротажного кабеля в геофизике в качестве стандартной принята магнитная метка вида  $SNNS$  [2–4]. По сути дела при нанесении такой магнитной метки осуществляется намагничивание двух соседних участков изделия (каротажного кабеля, троса) в противоположных направлениях. Такое намагничивание применяется для усиления и локализации пространственной составляющей магнитного поля метки поперечного относительно продольной оси изделия направления. Именно эта составляющая магнитного поля метки определяет значение выходного сигнала магнитомодуляционного преобразователя. Нанесение магнитной метки указанного вида осуществляется путем воздействия на изделие магнитным полем электромагнита с Ш-образным магнитопроводом (рис. 1).

На рисунке видно, что силовые линии магнитного поля электромагнита – 1 пронизывают соседние участки изделия – 2 в противоположных направлениях. В результате такого воздействия упомянутые участки изделия оказываются намагниченными в противоположных направлениях. В первом приближении можно считать, что длина намагниченных участков в случае неподвижного изделия примерно равна межполюсному расстоянию магнитопровода  $a$  (рис. 1, а). В случае движения изделия в продольном направлении со скоростью  $v$  длина намагниченных участков становится неодинаковой.

На рис. 1, б показан вид намагниченных участков в момент окончания импульса электрического

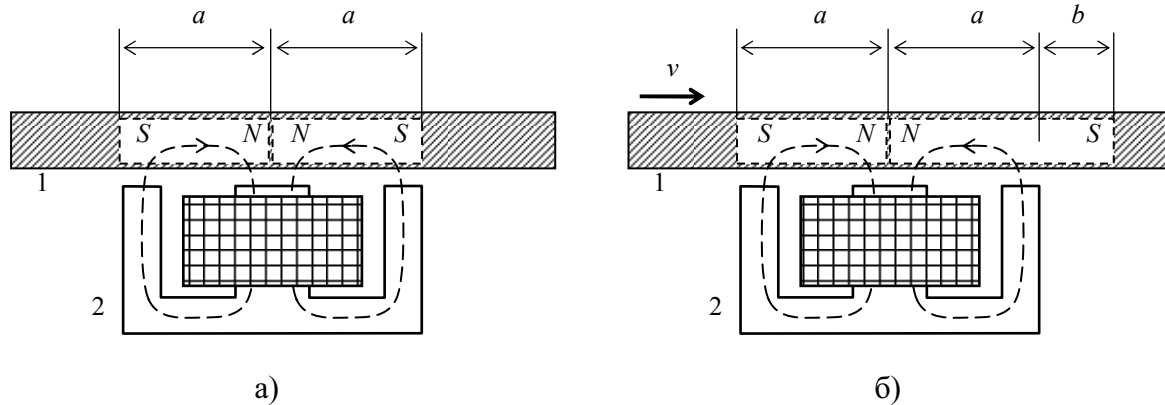


Рис. 1. Вид магнитных меток при записи на неподвижном (а) и движущемся (б) изделии: 1) изделие; 2) электромагнит

тока, подаваемого на электромагнит для записи магнитной метки. Первый по ходу движения намагниченный участок изделия оказывается длиннее второго на величину  $b$ . Значение  $b$  определяется скоростью  $v$  движения изделия и длительностью  $T$  импульса записи магнитной метки:

$$b = v \cdot T \quad (1)$$

Минимальная длительность импульса записи определяется длительностью переходного процесса в цепи обмотки электромагнита, зависящей в свою очередь от ее индуктивности. Поскольку при нанесении магнитных меток требуется обеспечить значение индукции, близкое значению индукции насыщения материала изделия, а поперечный размер изделия может достигать значений порядка нескольких десятков мм (например, при решении задачи измерения длины стальных канатов), то во многих реальных случаях длительность импульса записи не может быть менее единиц – десятков мс. При скоростях движения изделия порядка нескольких м/с величина  $b$  достигает значений порядка единиц – десятков мм.

Описанная выше геометрическая деформация магнитной метки при возрастании скорости движения объекта приводит в свою очередь к деформации ее магнитного поля. Поскольку в данном случае нас интересует только пространственное распределение интенсивности этого поля, а не ее абсолютное значение в конкретной точке пространства, можно воспользоваться для определения магнитного поля метки следующим упрощенным подходом. Будем считать, что поперечный размер объекта существенно меньше длины намагниченного участка  $a$ , а пространственное распределение магнитного поля этого участка протяженного объекта не отличается от соответствующего распределения магнитного поля равномерно намагниченного объекта ограниченной длины  $a$ .

Намагниченный участок объекта представим совокупностью элементарных областей с намагниченностью материала  $J_r$  и размером в продольном направлении  $dx$  (рис. 2).

В соответствии с определением намагниченности как магнитного момента единицы объема рав-

номерно намагниченного тела может быть записано выражение для модуля магнитного момента  $dm$  элементарной области  $dx$ :

$$dm = J_r S dx, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения намагниченной области.

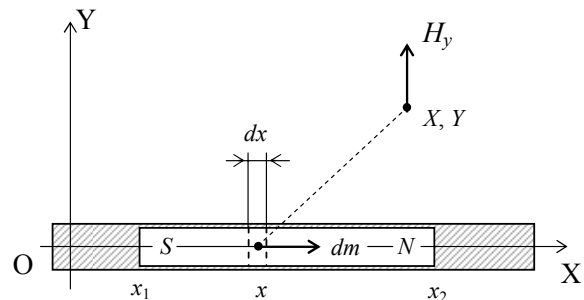


Рис. 2. Магнитное поле намагниченного участка объекта измерения

Как уже отмечалось ранее, сигнал магнитомодуляционного преобразователя определяется поперечной составляющей напряженности магнитного поля метки. В системе декартовых координат  $XOY$  в точке с координатами  $X, Y$  (рис. 2) модуль интересующей нас пространственной компоненты напряженности магнитного поля элементарной намагниченной области  $dH_y$  может быть определен с использованием приведенных в [5] выражений, описывающих поле магнитного момента:

$$dH_y = \frac{dm}{4\pi} \frac{3(X-x)Y dx}{[(X-x)^2 + Y^2]^{2.5}}, \quad (3)$$

где  $x$  – координата центра элементарной области по оси  $OX$ .

Модуль пространственной компоненты  $H_y$  напряженности магнитного поля, создаваемого в точке с координатами  $X, Y$  всеми намагниченными элементарными областями находится интегрированием выражения (3) после подстановки (2) в пределах границ намагниченного участка  $x_1$  и  $x_2$ :

$$H_y = \frac{J_r S}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{3(X-x)Y dx}{[(X-x)^2 + Y^2]^{2.5}}. \quad (4)$$

Если принять, что значение координаты  $X=0$  соответствует местоположению проекции оси симметрии электромагнита на движущееся изделие в момент начала импульса записи, то модуль компоненты напряженности результирующего магнитного поля метки рис. 1, б, на основании (4) и с учетом направлений векторов намагниченности может быть определен следующим образом:

$$H'_y = \frac{J_r S}{4\pi} \left\{ \int_{-b-a}^{-b} \frac{3(X-x)Y dx}{[(X-x)^2 + Y^2]^{2.5}} - \int_{-b}^a \frac{3(X-x)Y dx}{[(X-x)^2 + Y^2]^{2.5}} \right\}. \quad (5)$$

Для удобства анализа зависимости пространственного распределения магнитного поля метки от изменения скорости движения объекта целесообразно осуществить нормирование функции координат  $H'_y$  по максимальному значению этой функции  $H_0$  для случая  $v=0$  и соответственно  $b=0$ :

$$H_y^* = \frac{H'_y}{H_0},$$

где  $H_y^*$  – нормированное значение модуля поперечной составляющей напряженности магнитного поля магнитной метки.

Предлагаемое нормирование позволяет исключить зависимость результатов анализа от значений величин  $J_r$  и  $S$ . Значение  $H_0$  определяется по формуле (5) подстановкой  $b=0$  и  $X=0$ .

На рис. 3 приведены зависимости поперечной составляющей напряженности магнитного поля метки  $H_y^*$  от относительного значения продольной координаты  $X/a$  для разных значений  $b$ . Зависимость  $H_y^*(X/a)$  совпадает по форме с огибающей сигнала магнитомодуляционного преобразователя от прохождения магнитной метки. Анализ кривых рис. 3 показывает, что в случае неподвижного изделия ( $v=0$  и соответственно  $b=0$ ) магнитное поле метки симметрично относительно вертикальной оси  $X=0$ . При движении ( $v \neq 0$ ,  $b \neq 0$ ) поле магнитной метки деформируется. При этом нарушается симметрия и происходит смещение магнитной метки вдоль продольной оси.

Количественно степень влияния скорости движения на расстояние между соседними метками определяется расстоянием  $\Delta$  между передними фронтами кривых рис. 3 по уровню порога срабатывания устройства считывания магнитных меток (в качестве примера выбран уровень порога срабатывания  $0,5 \cdot H_0$ ). Для относительно малых значений зазора между магнитомодуляционным преобразователем и объектом ( $Y/a < 2$ ) зависимость смещения фронта метки от величины  $b$ , а значит и от скорости движения, носит линейный характер и можно ориентировочно принять, что  $\Delta \approx 0,7 \cdot b$  (рис. 4). Невыполнение условия  $Y/a < 2$ , как следует из анализа зависимостей рис. 4, приводит к резкому возрастанию значения  $\Delta$  и нелинейной зависимости смещения фронта метки от скорости.

В результате продольного смещения фронта магнитной метки при возрастании скорости движения метки наносятся реже. Соответственно возрастает расстояние между соседними метками, что может привести без учета такого влияния скорости к заниженному результату измерения длины. Относительная погрешность измерения, определяемая соотношением значений  $\Delta$  и базового расстояния  $L_0$ , как уже отмечалось, может достигать порядка единиц – десятков %, что во многих случаях не удовлетворяет требованиям к точности измерений.

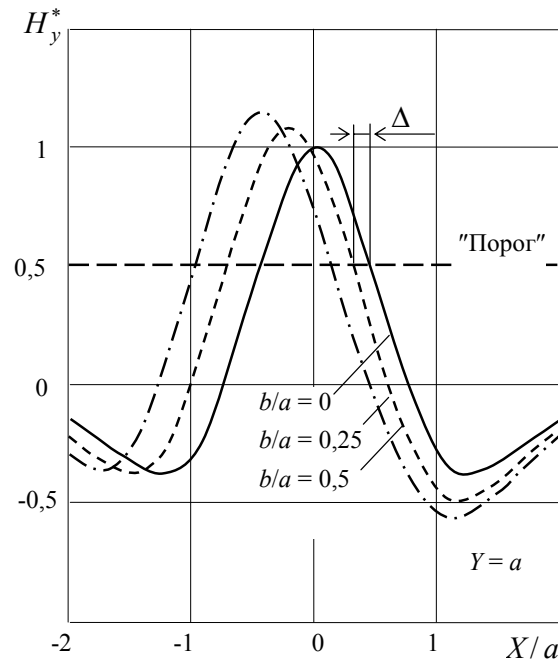


Рис. 3. Изменение формы сигнала от магнитной метки при изменении скорости

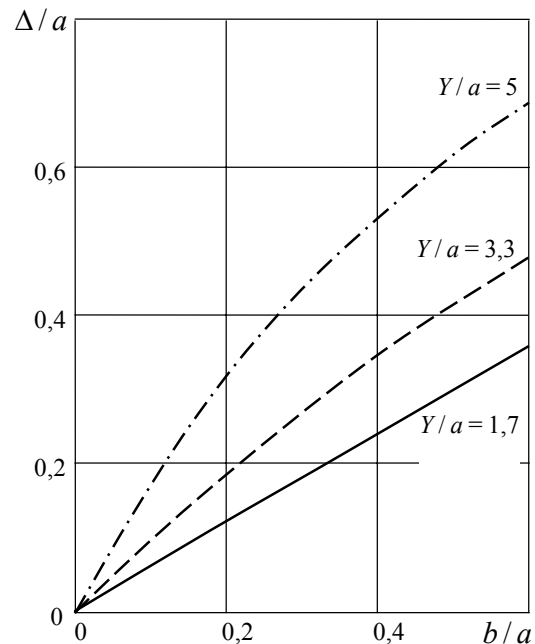


Рис. 4. Зависимость смещения фронта метки  $\Delta$  от величины  $b$  для различных значений координаты  $Y$

Существенное снижение погрешности, обусловленной изменением скорости движения объекта измерения, может быть достигнуто коррекцией базового расстояния  $L_0$  (мерной базы) на величину поправки, зависящей от скорости движения объекта. В этом случае измеряемое значение длины  $L_x$  при скорости движения изделия  $v$  в соответствии с результатами приведенного выше анализа находится по формуле:

$$L_x = N (L_0 + k v),$$

где  $N$  – число подсчитанных магнитных меток;  $L_0$  – базовое расстояние, определяемое для случая  $v \rightarrow 0$ ;  $k$  – постоянный множитель; произведение  $kv = \Delta$  – пропорциональная скорости движения величина поправки, на которую корректируется базовое расстояние  $L_0$ .

Величина  $k$ , имеющая размерность единицы времени – секунды, определяется прежде всего длительностью  $T$  импульса записи магнитной метки, но также зависит от геометрических параметров используемого для записи метки электромагнита, зазора между магнитомодуляционным преобразователем и изделием, выбранным порогом срабатывания устройства считывания магнитных меток и ряда других менее значимых факторов. Поэтому для достижения высокой точности измере-

ний длины значение  $k$  целесообразно определять экспериментально. Для приблизительной оценки значения  $k$  может быть использовано приведенное ранее равенство  $\Delta \approx 0,7 \cdot b$ , из которого с учетом (1) вытекает, что  $k \approx 0,7 \cdot T$ .

Мгновенное значение скорости движения  $v$ , необходимое для вычисления поправки  $\Delta$ , может быть определено путем измерения временного интервала  $t$  между соседними метками и на основе решения уравнения, связывающего величины  $v$ ,  $t$  и расстояние между соседними метками  $L_0 + kv$ :

$$t v = L_0 + k v, \quad \text{откуда} \quad v = \frac{L_0}{t - k}.$$

Описанный выше метод отстройки от влияния скорости движения был реализован в измерителе длины стальных канатов. Испытания опытного образца измерителя непосредственно в технологической линии производства стальных канатов Череповецкого металлургического комбината показали, что при использовании предлагаемого метода отстройки может быть достигнута высокая точность измерения даже при малых значениях базового расстояния  $L_0$  и большом диапазоне изменений скорости движения  $v$ . Так, при  $L_0 = 0,5$  м и  $v = 0,2 \dots 5$  м/с, максимальная погрешность измерения длины стальных канатов диаметром от 6 до 18 мм составила 0,3 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2082078 РФ. МКИ G01B 7/04. Устройство для измерения длины ферромагнитных изделий / А.Г. Цыпуштанов, А.А. Истомин, Д.И. Фозекош. – Заявлено 29.03.1994; Опубл. 20.06.1997, Бюл. № 6. – 5 с.: ил.
2. Кривко Н.Н. Аппаратура геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1991. – 384 с.
3. Померанц Л.И., Белоконов Д.В., Козляр В.Ф. Аппаратура и оборудование геофизических методов исследования скважин. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
4. КарСар УРП-01. Установка разметочная портативная. – Web site НПП «Геофизтехника» – <http://www.geoft.ru>
5. Гончарский В.Г., Калашников Н.И., Кузовкин С.К. Технические основы аэроэлектроразведки (с гармоническим полем). – Киев: Наукова думка, 1969. – 380 с.